



Projet n°. 015403

FONIO

**Amélioration de la qualité et de la compétitivité de la filière fonio en
Afrique de l'Ouest**

Projet de Recherche spécifique ciblé (STREP)
INCO

WORK PACKAGE 6

Acquisition des connaissances sur les systèmes de culture à base de fonio et voies
d'amélioration de la productivité

D 33

**Approche concertée et étapes méthodologiques pour
combiner des données biophysiques et socio-
économiques à différentes échelles**

Author: **Francis FOREST (Cirad)**

Workpackage leader : Didier STILMANT (CRA-W)

Project coordinator : Jean-François CRUZ (Cirad)

CRA-W: Centre Recherches Agronomiques Wallon (Belgique)

Mars 2007

Projet co-financé par la Commission Européenne au cours du 6ème programme cadre (2002-2006)		
Niveau de diffusion		
PU	Public	
PP	Restreint aux participants d'autres programmes (Services de la Commission inclus)	
RE	Restreint à un groupe spécifié par le consortium (Services de la Commission inclus)	X
CO	Confidentiel, restreint aux membres du consortium (Services de la Commission inclus)	

Author: **Francis FOREST**

Cirad (Centre de Coopération internationale en Recherche Agronomique pour le Développement)

Département: Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux

UPR Couverts permanents

Avenue Agropolis - TA B-01 / 07

34398 Montpellier Cedex 5 - France

Ce travail a été réalisé en collaboration avec:

Mali,

- Michel VAKSMANN (IER – Bamako)
- Seydou TRAORE (IER – Bamako)
- Birama DIARRA (IER – Bamako)

.

Guinée

- N'famara CISSE (IRAG – Bordo)
- Jacques GIGOU (IRAG- Bordo)

Belgique

Didier STILMANT (CRA-W - Libramont),
Brice DUPUIS(CRA-W - Libramont).

Remarque liminaire : Compte tenu des références bibliographiques nombreuses sur un thème aussi restreint, impliquant un excès de citations susceptible d'encombrer le texte, il a été décidé de se limiter à une liste bibliographique.

Nota: Ce travail a été soutenu financièrement par la Commission de la Communauté Européenne. Il ne reflète pas nécessairement les vues et en aucun cas ne préfigure la politique future de la Communauté dans le domaine.

Sommaire

	Pages
1 - Bases agro - climatiques de la production de biomasse	1
1.1. Le modèle de production de biomasse primaire	1
1.2. L'Eau facteur de production et de risque	2
1.3. L'Engrais facteur de production et de risque	2
2 - Choix d'un modèle agro - climatique	3
3 - L'estimation de l'évapotranspiration réelle ETR	5
4 - Présentation du modèle de base SARRA	6
5 - Les paramétrages indispensables du modèle	6
5.1. Le point sensible : La calibration des coefficients cultureux du fonio	7
5.2. L'innovation scientifique: la prise en compte du photopériodisme	8
6 - L'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique	9
7 - Le Zonage des potentialités agro - climatiques : cas du Fonio	10
8 - La validation du zonage par couplage des résultats du modèle	11
9 – Conclusion	12
10 - Bibliographie : Agroclimatologie et bilan hydrique des cultures	13

1 - Bases agro - climatiques de la production de biomasse

1.1. Le modèle de production de biomasse primaire

Pour comprendre les relations existant entre la production de biomasse et le climat, il est nécessaire de se référer aux connaissances de base acquises dans le domaine de la bioclimatologie. On propose ainsi de prendre en considération l'équation générale (Monteith, 1972; Varlet-Grancher, 1982) qui décrit l'ensemble du processus d'interception de la radiation solaire par le couvert végétal et son effet sur la production de biomasse primaire.

$$MS \text{ primaire} = \int_{t_0}^{t_1} E_c \cdot E_b \cdot E_a \cdot R_g \, dt$$

Équation 1. La fonction bioclimatologique de production de biomasse primaire

Cette équation met en jeu la ressource en énergie et trois fonctions d'efficience :

- **R_g** : Radiation globale vers la végétation.
- **E_c** : Proportion du rayonnement utile pour la photosynthèse. Défini comme le PAR. caractéristique de l'environnement climatique local.
- **E_b** : Conversion, en %, de la fraction active de la radiation, ou PAR, par la photosynthèse. Cette conversion est directement dépendante du type de plante (type C 3 ou C 4).
- **E_a** : Interception du PAR utile par la végétation directement liée à l'importance de la surface foliaire (L_{ai}), et par suite dépendante du système de culture, en particulier du mode de gestion du sol, du calage du cycle et du niveau d'intensification.

Les simulations agroclimatiques réalisées à partir des données climatiques de la zone soudano sahélienne montrent que des potentiels de production de biomasse primaire très élevés peuvent être atteints (50 t MS/ha) sous réserve de pratiques culturales performantes et d'une alimentation hydrique satisfaisante.

Dans la réalité, ce sont des productions en matière sèche totale de l'ordre de 5 à 10 t MS /ha qui sont obtenues en milieu rural, ce qui illustre bien le caractère contraignant des conditions biophysiques (risque hydrique) et socio économiques (absence de technologie). Au plan scientifique, les sciences agronomiques visent à optimiser les termes E_a et E_b à travers une amélioration globale du système de culture.

1.2. L'Eau facteur de production et de risque.

L'analyse des acquis de la recherche en bioclimatologie des écosystèmes semi – arides montre que les performances des cultures (C. Dancette et al, 1977), sont fréquemment affectées par une insuffisante alimentation hydrique de la culture au cours de périodes dite de sécheresse qui surviennent en cours de cycle de végétation. Ces stress peuvent être aussi bien liés au manque de pluie qu'à son excès. Dans ce dernier cas le stress doit être associé à une toxicité aluminique ou à un lessivage excessif des bases échangeables (cations), source de toxicité pour le système racinaire qui ne peut plus fonctionner correctement. Ainsi, si la pluviosité est un facteur indispensable pour assurer un état et un fonctionnement optimal de la plante, elle peut, si elle est mal contrôlée dans ses excès (ruissellement, drainage), constituer aussi une contrainte pour la production de biomasse primaire (MST) mais surtout secondaire (gousse, graine, tubercule.)

1.3. L'Engrais facteur de production et de risque

Les études conduites en zone soudano sahélienne ces dernières années, en particulier par le Cirad et ses partenaires, ont mis en évidence l'effet pervers de la fertilisation sur le rendement des cultures présentes dans les systèmes de la région lorsque, précisément, le régime pluviométrique s'avère incertain et irrégulier.

Dans ces situations, très fréquentes, les cultures ayant reçu une fertilisation développent, en retour, un LAI élevé et se retrouvent en situation de stress excessif en raison d'un épuisement rapide de la réserve en eau du sol lié à une évapotranspiration élevée pendant la période de manque de pluies.

A contrario, les cultures extensives, disposent, du fait de leur moindre évapotranspiration (liée à une Lai faible et à un contrôle de l'enherbement par sarclage), au cours de la même période, d'un stock d'eau de sécurité leur permettant d'éviter cet état de stress.

Ce processus ne pourra pas être ignoré dans les analyses à conduire au sein du projet pour expliquer la réticence des agriculteurs de ces régions à se lancer dans des systèmes consommateurs d'un engrais qu'il faut acheter, épandre alors que le résultat escompté reste incertain.

Ce comportement méritera d'être vérifié pour comprendre pourquoi les agriculteurs ne souhaitent pas apporter de l'engrais sur la culture du fonio. Pour ce faire, les questions suivantes seront traitées :

- Est-ce le régime pluviométrique qui est trop aléatoire ?
- Est-ce la variété qui ne répond ni à l'eau ni à l'engrais ?
- Est-ce le système de culture, le mode de gestion qu'il convient de changer ?

2 - Choix d'un modèle agro - climatique pour la caractérisation des potentialités et contraintes biophysiques de production du Fonio

Compte tenu de cette dépendance par rapport au facteur hydrique et considérant que la température et la radiation solaire ne sont pas les principaux facteurs limitants, on admettra que la caractérisation des potentialités de croissance et de développement des variétés de fonio ainsi que l'estimation de la variabilité interannuelle de leur rendement pourra être réalisée, dans une première étape, en procédant à une caractérisation fréquentielle des termes du bilan hydrique de la culture ainsi qu'à une analyse, en terme de probabilité, des chances pour la culture du fonio de voir ses besoins en eau satisfaits.

Pour ce faire, il est proposé par le Cirad, d'utiliser, comme base de travail, un modèle validé et ayant fait ses preuves dans la région : le modèle SARRA¹ utilisé pour la réalisation de diagnostic hydrique des cultures (DHC²) dans la zone AGRHYMET.

On rappellera, d'une manière brève, les principes de base proposés par ce modèle.

L'offre en eau est caractérisée par la pluviométrie (Pd) susceptible d'être modulée, d'une part, par le ruissellement (Rd) et, d'autre part, par la réserve en eau Rsd utilisable par les racines.

La demande en eau est caractérisée par le besoin en eau de la plante (ETMd) qui est fonction de l'Evapotranspiration potentielle décadaire (ETPd) et du développement de l'indice foliaire (LAI). Les coefficients culturaux décadaires (Kc), représentant le ratio entre le besoin maximum de la plante ETM et l'ETP régionale de référence, ont été mesurés *in situ* (tableau 1) pour les principales cultures de la zone soudano sahélienne. Le cas du Fonio sera étudié à la station de Sotuba en 2007.

La réserve utile du sol : les plantes exploitent l'eau du sol (Sd) entre deux limites qui définissent la réserve utile :

- teneur en eau en dessous de laquelle la culture ne parvient plus à transpirer, évaluée par la teneur en eau à $pF=4.2$ et dite teneur en eau au point de flétrissement permanent (Spf) ;
- teneur en eau maximale au delà de laquelle l'eau s'écoule par gravité, dite capacité au champ (Scc).

La réserve utile s'exprime par l'équation : $RU = Scc - Spf$.

Elle caractérise une humidité volumique utilisable par la plante. L'expression en humidité pondérale (soit RU en mm) doit alors prendre en considération la densité apparente du sol. On en déduit que la réserve utile des sols dans la zone soudano sahélienne est très variable. Les ordres de grandeur vont de 50 mm (sol sableux) à 130 mm (sol argileux) par mètre de sol colonisé par les racines. La texture a par la suite une grande influence sur la RU. De même, la profondeur de sol colonisable par les racines est un facteur pouvant limiter la réserve utile. Elle dépend de

¹ SARRA : Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques

² DHC Diagnostic Hydrique de Cultures développé par le Cirad et le Centre Agrhyment à Niamey.

l'espèce cultivée, des techniques culturales (cas de la semelle de labour) et des obstacles physiques et chimiques que le sol peut opposer à la croissance racinaire, tels qu'un horizon compacté, induré ou un horizon présentant une toxicité aluminique.

La réserve utile racinaire

R_{Ur} est la valeur de la RU obtenue lorsque S_{cc} et S_{pf} sont évalués entre la surface et la cote maximale atteinte par les racines pour la culture considérée.

Le Stock utile (S_d) auquel peut correspondre un stock utile racinaire est la quantité d'eau utilisable par la culture à un moment donné :

$$S_d = \text{humectation (offre en eau dans le sol)} - S_{pf} \quad \text{si } S_d < S_{cc}$$

$$S_d = R_{Ur} \quad \text{si } S_d \geq S_{cc}$$

On rappellera que l'offre en eau du sol est estimée en considérant la pluie utile et le stock en eau en fin de période précédente.

Le cycle cultural

La plante est caractérisée par la durée de son cycle végétatif, décomposé en période de végétation caractérisant les différents stades de développement de la plante. On citera les 4 phases pour le cas de céréales telles que le mil : installation, initiation paniculaire, floraison et maturation. Compte tenu du caractère photosensible et photopériodique du fonio (hypothèse en cours de validation par Vaksman et al.), avec pour conséquence une date de floraison quelle que soit la date de semis-levée, le modèle de bilan hydrique devra être adapté pour prendre en compte cette spécificité dans le calcul final de la durée exacte des phases de végétation, la période initiale d'installation pouvant s'allonger en fonction de la précocité de la date de semis.

La date de semis

Prenant en compte les savoirs et les pratiques traditionnelles, le modèle considère une règle de décision permettant de déclencher, au moindre risque, le semis à une date donnée. Cette règle considère le risque encouru, à une date donnée, par la jeune plantule de lever dès la pluie et de se retrouver en situation de sécheresse dans les jours suivants. Ce risque et la valeur seuil diminuent rapidement en fonction du temps qui s'écoule à partir d'une date identifiée et dépendante du régime d'arrivée des premières pluies.

Cette valeur '*pluie seuil de semis-levée réussie*' est évidemment dépendante de la texture du sol. Plus le sol est argileux, moins l'humectation du profil est importante pour une pluie donnée. Cet effet texture explique pourquoi les paysans prennent moins de risque à semer précocement dans les sols sableux, à la différence de sols plus lourds qui imposent d'attendre. On note ainsi, en accord avec cette logique, que la culture du fonio est plutôt consacrée aux sols sableux avec des pratiques traditionnelles de semis en sec dans de nombreux terroirs en Guinée, au Sénégal et au Mali.

3 - L'estimation de l'évapotranspiration réelle ETR

Le bilan hydrique exprime la conservation, entre deux dates quelconques, de la masse d'eau présente dans le système sol/plante/atmosphère. Cette eau est répartie entre, d'une part, l'eau stockée dans le sol et dans la plante et, d'autre part, les flux entrant et sortant de ce réservoir sol. (figure.1)

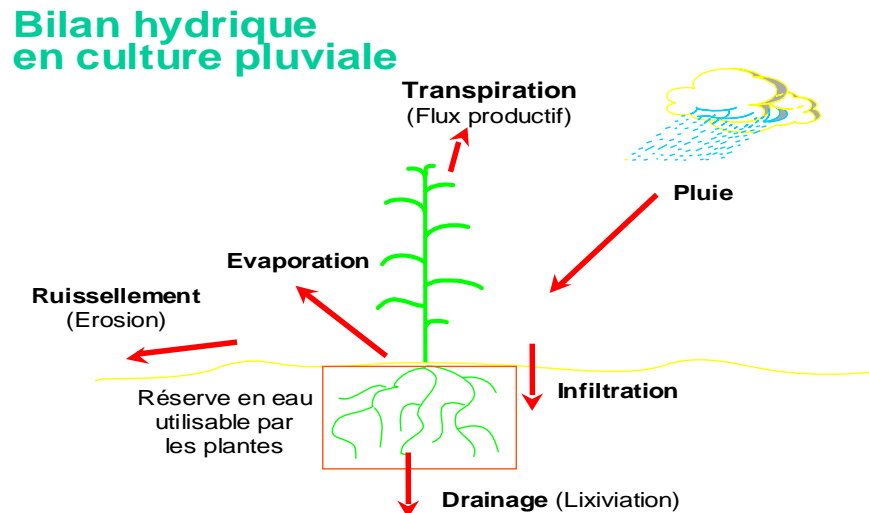


Figure 1. Flux hydriques à l'échelle de la parcelle cultivée

Le calcul de l'évapotranspiration réelle décadaire (ETRd) de la plante est réalisable à partir de l'équation :

$$ETRd = Pd - Rd + Id - Dd - Sd$$

Où :

- Pd : précipitations reçues au cours de la décade ;
- Id : irrigations ;
- Dd : drainage sous la zone de sol exploitée par la culture ;
- Rd : pertes en eau par ruissellement de surface ;
- Sd : variation du stock d'eau du sol accessible par les racines.

Équation 2. Evapotranspiration réelle décadaire

Pour la simulation de l'alimentation hydrique de la culture du fonio, le pas de temps de 10 jours est proposé dans la mesure où il permet de prendre en compte les interactions importantes entre le type variétal, la date de semis, le type de sol et chacun des termes du bilan hydrique. Si nécessaire, en complément des expérimentations, des simulations au pas de 5 jours ou journalières seront réalisées en vue, notamment, de mieux expliquer l'effet de la pluviométrie sur la production de grain. L'estimation de l'ETR *in situ* reviendra donc à évaluer l'évolution de l'humidité du sol. Celle-ci est possible en faisant appel à un algorithme simple tel que celui proposé par Eagleman.

$$Hrsol = \text{Stock disponible} / \text{humidité maximale sur le profil colonisable.}$$

Pour estimer ce ratio, on notera que plusieurs formules peuvent être testées depuis l'équation linéaire jusqu'au polynôme du troisième degré. Le choix de la formule la plus adaptée sera réalisé en 2007 à partir des jeux de données et mesures obtenues sur les parcelles des Centres IER de Sotuba (Mali) et IRAG de Bordo (Guinée).

4 - Présentation du modèle de base SARRA

Le modèle SARRA (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques) a été mis au point par le CIRAD, spécifiquement pour les cultures pluviales (éventuellement avec irrigation de complément) en régions tropicales. Il fonctionne au pas de temps journalier (avec cumul décadaire ou pentadaire), ne sépare pas l'évaporation du sol de la transpiration de la culture, propose plusieurs options de simulation du ruissellement et considère un réservoir de taille variable en fonction de la progression des racines en profondeur. Les données d'entrée sont la pluviométrie journalière, ETP (évapotranspiration potentielle journalière ou décadaire), les coefficients culturaux, la réserve utile du sol, les paramètres de la fonction de ruissellement et la vitesse de descente du front racinaire. Le calcul de l'ETR de la culture proposée repose sur une relation empirique robuste entre le taux de remplissage de la réserve utile racinaire et le rapport ETR/ETM. Le ruissellement est estimé en caractérisant un état de surface moyen du champ (fonction du mode de gestion). Le drainage se produit lorsque les apports d'eau (pluie + irrigation - ruissellement) excèdent la capacité de stockage du sol. Une fois qu'ont été ainsi calculés ETR, D (Drainage), R (Ruissellement), le stock final de chaque jour est actualisé en appliquant l'équation du bilan hydrique.

5 - Les paramétrages indispensables du modèle

A compter de la seconde année du projet, en disposant des mesures de surface foliaire acquises sur la station de l'IER de Sotuba ainsi que des estimations de production de biomasse primaire et secondaire sur plusieurs parcelles d'observation en station, il devient possible de calibrer les coefficients culturaux $K_c = ETM/ETP_r$ (figure 2) et de préciser la fonction de prévision de rendement en biomasse :

$$P = f(ETR_{cycle}, ETR/ETM \text{ phase critique})$$

Cette fonction sera calibrée pour un type de sol (RU) et pour 2 à 3 niveaux de fertilisation : le niveau F0 correspondant au système traditionnel, le niveau F1 avec fumure recommandée par la recherche, enfin le niveau F2 correspondant au potentiel maximum d'activité racinaire et de production qui sera identifié sur les essais mis en place à Bordo (Guinée) et à Sotuba (Mali). Une fois cette calibration et validation réalisée, il sera possible en année 3 de réaliser la simulation du bilan hydrique pour l'ensemble des situations où l'on disposera de données agroclimatiques fiables.

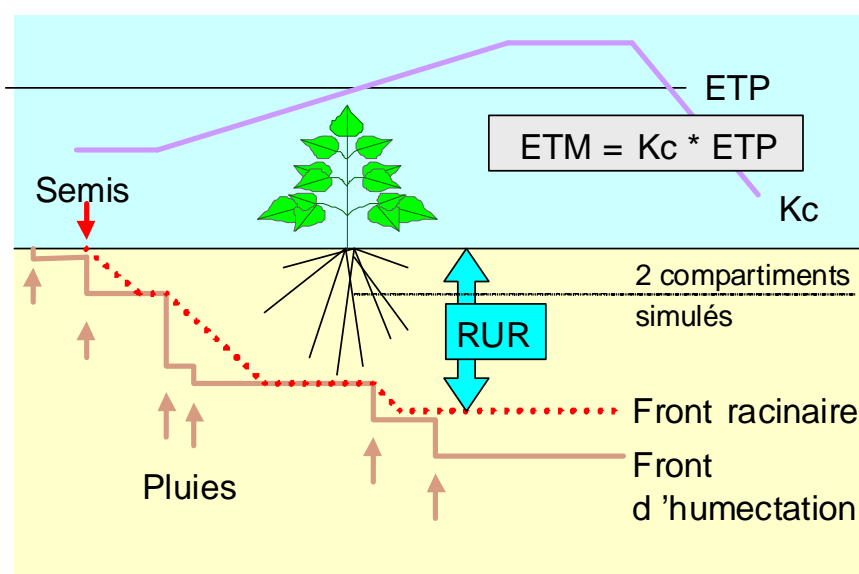


Figure 2. Paramétrisation du modèle de bilan hydrique

5.1. Le point sensible : La calibration des coefficients cultureux du fonio

Le rapport entre évapotranspiration potentielle de la culture et de référence varie au cours du cycle de la culture, principalement en fonction de son indice de surface foliaire LAI (rapport de la surface de feuilles à la surface occupée au sol par la culture). Comme le LAI dépend de la fertilité du sol, de l'espèce et du cultivar utilisé, et d'une manière générale de toutes les techniques de gestion de la culture utilisées, la demande en eau de la culture dépend également de tous ces facteurs. Dans le cas où aucun de ces facteurs n'est limitant pour la croissance, l'indice de surface foliaire suit une courbe temporelle qui dépend du rayonnement (fraction interceptée par la plante plus précisément), de la température et l'évapotranspiration potentielle de la culture est maximale. Cette situation correspond à l'évapotranspiration maximale ETM de la culture. Le rapport entre cette ETM de la culture et l'évapotranspiration potentielle (Penmann) de référence est également maximal et reçoit le nom de coefficient cultural, k_c . Ce dernier varie le plus souvent entre 0,4 et 1,4 en fonction de l'espèce cultivée, du stade de développement et du niveau de croissance.

$$k_c = ETM/ETP \quad \text{avec} \quad K_c = F(Lai)$$

Équation 3. Coefficient cultural

La relation entre le coefficient cultural et le LAI n'est pas linéaire : le k_c augmente d'abord rapidement avec l'indice foliaire, puis devient progressivement moins variable et se stabilise à des valeurs comprises entre 1,1 et 1,4 pour des LAI élevés (au-dessus de 4).

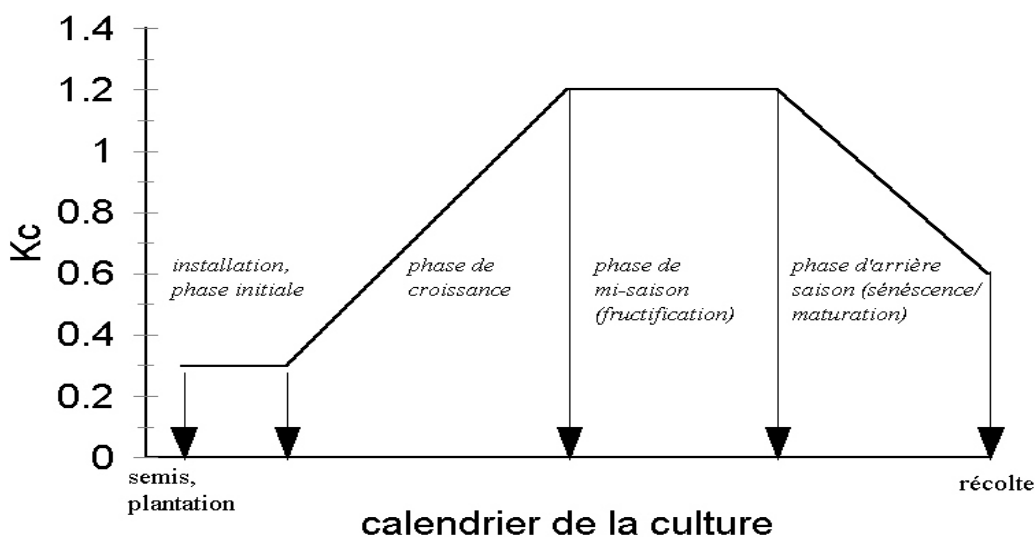


Figure 3. Représentation fonctionnelle des coefficients cultureux en fonction du stade phénologique de la plante

Dans le cadre du présent projet, les expérimentations conduites à Sotuba visent à caractériser les différents K_c pour les variétés photosensibles en fonction de la durée de leur cycle, elle même liée à la date de semis. On peut noter que ces valeurs de K_c ont été obtenues par mesure du bilan hydrique *in situ* et prise en compte de l'évaporation de référence (bac classe A) au cours des périodes de la saison des pluies où l'humidité du sol n'est pas limitante (conditions dites de Penmann).

Soit ETR max in situ mesurée par l'équation : $ETR_{max} = \Delta \text{stock mesuré}$

Avec la prise en compte de la demande évaporative $ETP = \text{Eva bac classe (en saison des pluies)}$

$Kc \text{ mesuré} = ETR_{max} / \text{Eva bac classe A}$

On précisera que ces valeurs sont valables en saison des pluies et qu'une correction devra être apportée au cas où la culture du fonio serait irriguée en saison sèche : $Eva = 1,2 \text{ ETP}$ (saison sèche). Soit la nécessité de multiplier par ce facteur 1,2 les coefficients culturaux Kc proposés ci-après.

Culture	Kc initial	Kc croissance	Kc épiaison floraison	Kc arrière-saison	Remarque
Légumineuses					
Arachide	0,4-0,5	0,7-0,8	0,95-1,1	0,75-0,85	
Haricots secs	0,3-0,4	0,7-0,8	1,05-1,2	0,65-0,75	
Haricots verts	0,3-0,4	0,65-0,75	0,95-1,05	0,9-0,95	
Lentilles			1,05-1,2	0,3-0,25*	*kc récolte
Soja	0,3-0,4	0,7-0,8	1,0-1,05	0,7-0,8	
Graminées					
Canne à sucre	0,4-0,5	0,7-1,0	1,0-1,3	0,75-0,8	
Maïs	0,3-0,5	0,7-0,85	1,05-1,2	0,8-0,95	
Mil	0,5	0,7	1,0-1,15	0,3-0,25*	*kc récolte
Riz	1,1-1,15	1,1,1-1,5	1,1-1,3	0,95-1,05	
Sorgho	0,3-0,4	0,7-0,8	1,0-1,15	0,75-0,8	
Plantes textiles et autre					
Coton	0,4-0,5	0,7-0,8	1,05-1,25	0,8-0,9	
Sisal	0,3-0,4				

Source : Dancette, IRAT, bulletins FAO 24 (1976, 1992)

Tableau 1. Coefficients culturaux Kc en fonction du stade phénologique (avec fertilisation moyenne)

On peut noter, à titre d'information, que les coefficients Kc pour une culture de mil en milieu paysan, soit en absence d'engrais, varient entre $kc = 0,5$ (semis) et $kc = 0,7$ (floraison). Il sera intéressant de comparer ces valeurs avec celles qui seront mesurées pour la culture du fonio non fertilisé.

5.2. L'innovation scientifique: la prise en compte du photopériodisme

Les recherches conduites au Mali sur le sorgho (Vaksmann et al.) ont montré qu'il existe de nombreuses variétés, dites traditionnelles, de céréales en zone soudano sahélienne qui expriment une photosensibilité vis à vis de la durée du jour. Le projet FFEM (2001-2006) conduit par l'IER et le Cirad a montré que cette caractéristique est de nature génétique et qu'elle peut dès lors être utilisée en sélection pour améliorer les performances des cultivars. Ainsi, de nombreux essais multilocaux ayant montré que ces variétés de mil et sorgho sont capables de produire plus de grain par mm de pluie les années où la saison des pluies commence relativement tôt, il s'avère utile pour le projet de travailler cette question pour le cas du fonio sachant que des résultats préliminaires ont été obtenus récemment au Nigeria sur *Digitaria Exilis*.

Pour réaliser les simulations du bilan hydrique, il conviendra par suite de prendre en compte cette aptitude et de proposer un algorithme adapté pour la caractérisation de la durée des phases de végétation et de leur allongement en fonction de la précocité de la date de semis.

Un des grands objectifs agro-économiques du projet FONIO, dans le cadre de son WP6, sera en

définitive de valider cette hypothèse et de proposer une approche et une méthodologie pour l'obtention et la reproduction de ce type de variétés par les agriculteurs. Ceci constitue donc un résultat majeur attendu du WP6.

6 - L'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique

Le logiciel de base SARRA contient trois modules : (1) SARRAMET, qui permet la gestion et l'analyse des données climatiques avec, en particulier, le calcul de l'ET₀, (2) SARRABIL adapté à la simulation du bilan hydrique à des fins de diagnostic à la parcelle, et (3) SARRAZON, adapté aux analyses régionales du risque climatique en agriculture, avec notamment la capacité de réaliser une analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique.

Disposant du modèle calibré des termes du bilan hydrique, le travail de recherche visera à identifier et disposer d'un jeu de paramètres adaptés permettant de traiter des questions posées sur le terrain. En premier lieu, l'analyse fréquentielle précise du **régime des pluies**, (Franquin *et al.*, 1977), sera nécessaire pour évaluer la variabilité spatiale et temporelle de la durée de la saison de végétation et en particulier de la date de son début et de son terme. Les travaux précédemment réalisés pour le mil et le sorgho au Mali, récemment étendus aux stations de référence retenues pour la Moyenne et Haute Guinée et pour la région de Ségou - Cinzana, permettent de caractériser la loi de variation de l'événement « *saison de végétation* ».

Les résultats (figure 4) calculés par l'équipe labosep de Sotuba, montrent ainsi une excellente représentativité et complémentarité des trois agroclimats considérés : de 210 à 140 jours, en Moyenne et Haute Guinée, la gamme des cycles possibles se réduit à l'intervalle 70-150 jours pour les régions de Cinzana et du Séno. La mise en évidence d'une relation homogène entre la durée espérée de la période de végétation, favorable à la croissance et au développement de la culture du Fonio, et la date du début de la saison des pluies confirme, par suite, l'intérêt d'étudier le photopériodisme chez le fonio en vue d'en analyser les conséquences sur les termes du bilan hydrique de la culture et par suite sur sa productivité et sa stabilité en année humide comme sèche.

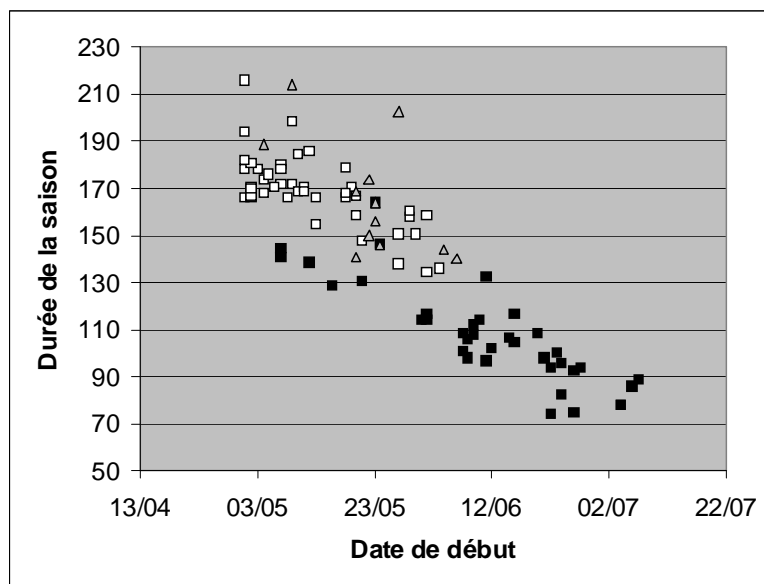


Figure 4. Durée potentielle de la saison de végétation en fonction de la date de semis.

Des scénarii de bilan hydrique, calculés pour la gamme des dates de semis possibles, seront développés en fonction des hypothèses de longueur de cycle caractérisant les divers types de cultivar de fonio susceptibles de valoriser au mieux la ressource pluviométrique.

7 - Le Zonage des potentialités agro - climatiques : cas du Fonio

L'outil de simulation du bilan hydrique qui aura été calibré sur quelques parcelles de référence, sera utilisé pour réaliser un zonage des potentialités agroclimatiques du fonio pour les 3 régions considérées par le projet. Les simulations devront ainsi produire, sous la forme fréquentielle, des estimations de l'ETR et autres indicateurs de rendement sur la base de scénarii représentatifs des systèmes de culture propres aux 3 régions qui auront été documentés par le WP 5. Pour ce faire, il conviendra de caractériser la variabilité des principaux facteurs entrant en ligne de compte. Ainsi, la durée utile de végétation, selon les types variétaux de fonio, devra faire l'objet d'un ensemble de caractérisations et analyses au champ (stations de Sotuba (Mali) et Bordo (Guinée)) préalable aux simulations et fera l'objet d'une validation à l'occasion du travail d'analyse réalisé suite aux campagnes de collecte des cultivars réalisées en 2006.

Disposant de la gamme des durées de cycle possibles, on disposera de simulations du bilan hydrique pour des idéotypes variétaux de Fonio ayant une durée de cycle théorique variant de 70 à 210 jours. Les simulations, réalisées de 10 en 10 jours pour un type de sol donné, permettront d'estimer les variables suivantes :

- Pluie, ETP et ETM cumulées sur le cycle
- Ruis : lame ruisselée dans les situations où cela se justifie
- ETRcycle et ETR i / ETM i par phase de végétation (i)
- DR : drainage sous l'enracinement par phase de végétation = indicateur de lessivage
- Le rendement espéré du fonio, en matière sèche totale et en grain, calculé à partir d'une courbe de réponse qui aura été calibrée à partir des enquêtes de terrain.

Les résultats seront cartographiés en considérant deux hypothèses de réserve en eau du sol. On disposera alors, pour un type de sol et un agroclimat donné, d'informations sur l'espérance de rendement en fonction de la date de semis-levée, de la durée de cycle et de la variabilité des pluies. Disposant de rendements observés in situ, il sera proposé de calibrer la fonction de production du rendement du type :

$$\text{Iresp (rdt grain)} = \text{ETRcycle/ETM cycle} \times \text{ETR/ETMpc}$$

$$\text{Avec rendement espéré} = a \times \text{Iresp} - b$$

Équation 4. Fonction de production du rendement

ETRpc/ETMpc représente la satisfaction des besoins en eau au moment de la période critique de l'épiaison - floraison qui permet d'estimer l'effet du facteur hydrique sur le rapport grain/paille.

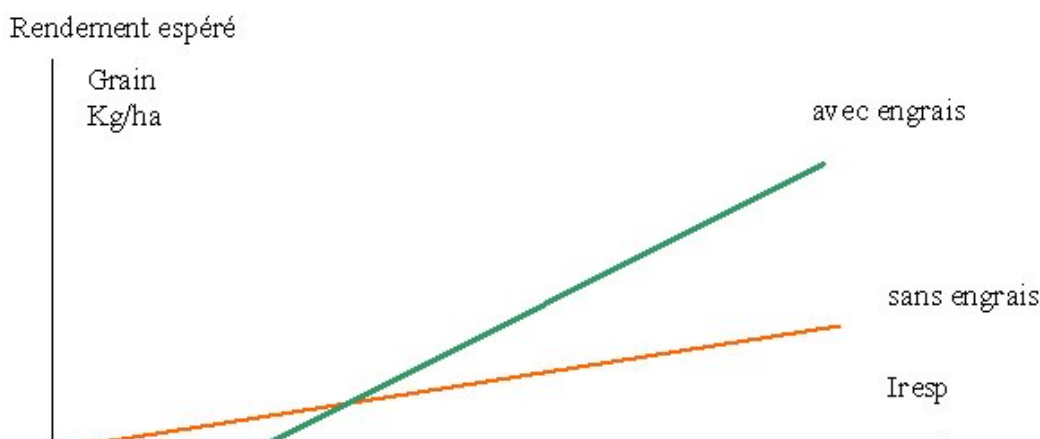


Figure 5. Courbe de réponse à l'eau en agriculture pluviale

8 - La validation du zonage par couplage des résultats du modèle avec ceux des enquêtes sur les systèmes et les conditions socio-économiques

Dans la mesure où les compétences techniques seront disponibles, des observations ponctuelles seront faites sur les systèmes en milieu paysan. On tentera ainsi de comparer les estimations du modèle avec les observations chez les agriculteurs. Les suivis de parcelle proposés dans le WP 5 seront donc mis à profit pour vérifier la pertinence des paramétrages utilisés dans la simulation et permettront, si nécessaire, de réaliser des simulations spécifiques pour un milieu donné ou pour un cultivar donné. Ces traitements permettront d'explorer la variabilité des situations rencontrées et donneront des indications complémentaires par rapport au zonage « moyen » qui sera proposé pour l'échelle régionale.

Dans ce cadre, les observations au champ porteront sur les variables suivantes :

Etat de surface

Ce paramètre, indicateur de la rugosité du sol, conditionne la propension du sol à ruisseler. Sans avoir à recourir à des mesures de l'état de surface du sol (méthode de Roose, 2004), on pourra effectuer une notation en observant la présence de traces de ruissellement, l'existence d'accumulation de sédiments caractéristiques de la désagrégation, etc. Trois niveaux d'état de surface seront alors à renseigner

- 1 : très bon état : présence d'agrégats, sol noir, présence des résidus végétaux
- 2 : état moyen : hétérogénéité spatiale, zones de désagrégation, traces de ruissellement
- 3 : état dégradé : présence de chemins d'écoulement, désagrégation, induration de la surface du sol.

Ces niveaux permettront de piloter le module de ruissellement à la parcelle et d'effectuer une étude de sensibilité.

Pluviométrie locale

Selon les situations où l'on disposera de données ponctuelles, dans les villages suivis et les stations expérimentales, des simulations seront effectuées à partir des données de pluie journalière à la parcelle et en prenant en compte le calendrier cultural spécifique.

Mesures phénologiques et de développement végétatif

Dans les villages suivis et dans les stations expérimentales, un suivi phénologique du fonio sera également effectué. On enregistrera la date de levée (date à laquelle 50% des plants auront levé), la densité de peuplement à l'épiaison, à la récolte, la hauteur des plants. Là où ce sera possible, une estimation de l'indice foliaire à la maturité sera réalisée sur base du protocole mis en place par les équipes de Sotuba.

Suivi de la biomasse aérienne

A la récolte, la biomasse aérienne sera estimée en récoltant deux carrés de 4 m² par parcelle élémentaire. On comptera le nombre de plant, toute la biomasse sera collectée, pesée et un aliquote sera prélevé pour l'estimation du poids sec. Ces mesures serviront à la calibration de l'indicateur de rendement espéré en fonction des termes du bilan hydrique.

L'environnement de l'exploitation

En complément des observations de nature biophysiques, les informations relatives aux contraintes d'exploitation seront prises en considération. Une attention particulière sera apportée à toute information susceptible de renseigner sur le bon déroulement de la campagne agricole, les travaux culturaux et, le cas échéant, les dates et quantité d'apport des différents intrants. Ces informations permettront d'expliquer tout ou partie de l'écart susceptible d'être constaté entre les rendements réels obtenus chez le paysan et le rendement potentiel fourni par le zonage. Cette analyse des écarts permettra d'identifier les contraintes autres que biophysiques s'opposant au gain de productivité, de les hiérarchiser et d'en tirer des orientations pour l'avenir en s'inspirant du schéma de réflexion développé ci après.

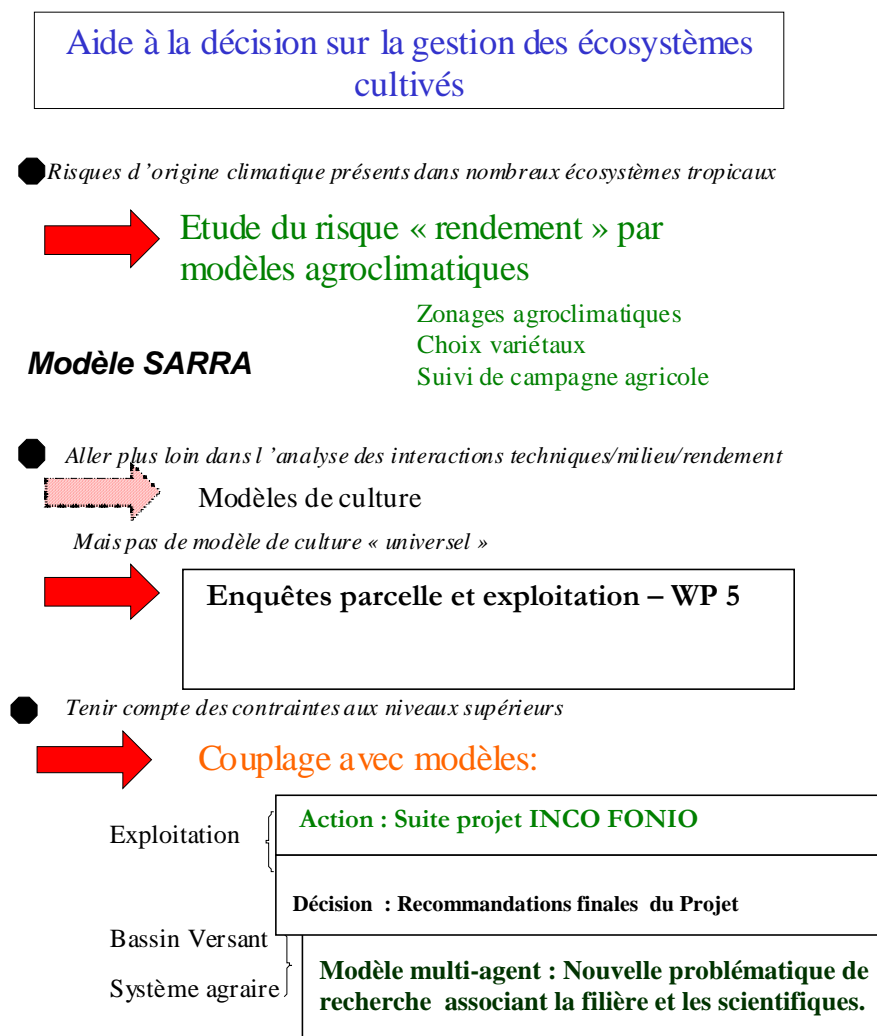


Figure 6. Schéma de réflexion ➔ aide à la décision

9 - Conclusion

La méthodologie proposée doit nous permettre d'appréhender les potentialités offertes par la culture du fonio tout au long d'un gradient de conditions pédoclimatiques (cf. livrable 31) et sous une large diversité de systèmes de production.

Elle nous permettra dès lors d'identifier les freins à l'extension de cette culture, tant en terme de contraintes pédoclimatiques que socio-techniques, ainsi que les moyens de les lever en particulier en proposant des innovations en matière de système de culture (semis direct sur couverture végétale).

10 - Bibliographie : Agroclimatologie et bilan hydrique des cultures

- Affholder, F., Reyniers, E., SCOPEL** 1994. L'eau et l'activité agricole : diagnostic et modélisation du fonctionnement de quelques hydrosystèmes agricoles tropicaux. Actes du Symposium International recherches-système en agriculture pour le développement CIRAD Montpellier. p 411-419
- Affholder, F.**, 1991. Influence de la gestion de la fertilité et du contrôle de l'enherbement sur l'efficacité de l'eau et la production du mil pluvial - Atelier GAP/R3S - Bamako Déc. 1993.
- Affholder, F.**, 2001. Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Thèse INA PG, Paris, décembre 2001;
- Affholder, F.** 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research* 52, 79-93.
- A.A. Aliero¹, A., A., Morakiny, J., A.**, 2005. Photoperiodism in *Digitaria exilis* (Kipp) Stapf accessions. in *African Journal of Biotechnology* Vol. 4 (3), pp. 241-243, March 2005
- Bacci, L., Reyniers, F-N (Eds).** 1998. Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride. Actes du séminaire international, 27-30 avril 1998, Florence, Italie. Ed. CeSIA, Florence, Italie, CIRAD, Montpellier, France. 270 pp.
- Baron, C, Reyniers, F., N., Clopes, A., Forest, F.**, 1999. Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques. *Agriculture et Développement* 24, 89-97
- Baron, C, Clopes, A, Perez, P, Muller, B, Maraoux, F**, 1996. Manuels d'utilisation de : SARRAMET 45 p, SARRABIL 35 p et SARRAZON 29 p, CIRAD, Montpellier, France.
- Baron, C, Sarr, B, Bonnal, V, Diouf, O, Dingkuhn, M**, 2003. SARRAH, a crop model for PROMISE. Oral presentation on the conference « Monsoon environments: Agricultural and hydrological impacts of seasonal variability and climate change », ICTP, Trieste, Italy, 24-28 March 2003.
- Bertrand, R, Gigou, J.**, 2000. La fertilité des sols tropicaux. Paris : Maisonneuve et Larose, 2000. - 397 p. - Le technicien d'agriculture tropicale ; 40
- Cochemé, J., Franquin, P.**, 1967. A study of the agroclimatology of the semiarid area south of the Sahara in West Africa, FAO/UNESCO, 325 p.
- Dancette, C.**, 1983. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agro Trop.* 38 : 281-92.
- Dingkhun, M., Baron, C., Bonnal, V., Maraoux, F., Sarr, B., Sultan, B., Clopes, A., Forest, F.**, 2003. Des outils d'aide à la décision pour les cultures pluviales au Sahel au niveau de la parcelle et au niveau régional. Ed Cirad, Montpellier.
- Doorenbos, J, Kassam, AH.**, 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO, Rome, Italy, 193pp.
- Doorenbos J, Pruitt, WO.** 1977. Guidelines to predicting water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. FAO, Rome, Italy, 179pp.
- Eagleman, J.**, 1971. An experimental derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Meteorol.* 8, 385-394.
- ESPACE**, 1991. Evaluation, suivi de la production en relation avec le climat et l'environnement. Aghrymet-Cirad. Atelier de Mindelo - Cap Vert - CIRAD - Minicoop.
- Forest, F., Clopes, A.**, 1994. Explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In " Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale". Atelier R3S Bamako, décembre 1991, Reyniers and Netoyo , pp 3-15. J. Libbey. Paris

- Forest, F., Cortier, B., 1991.** Diagnostic hydrique des cultures et la prévision du rendement régional du mil cultivé dans les pays du CILSS. In : Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone, M.V.K. Sivakumar, J.S. Wallace, C. Renard et C. Giroux éd. Proceedings of the Niamey workshop, Niamey, Niger, février. Wallingford, lahs Press, p. 547-557.
- Girard, X., Baron, B., Cortier, B., 1991.** DHC version 4. Logiciel de Diagnostic Hydrique des Cultures. Manuel d'utilisation. AGRHYMET, Niamey, Rep. Niger
- Goze, E., 1990.** Modèle stochastique de la pluviométrie au Sahel. Application à l'agronomie. Générateur des pluies. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, France, 1990.
- Konate, I. M., Doumbia, Y.O., Scheuring, J.F., 1984.** L'amélioration de la culture du sorgho. Proceedings of the Regional Workshop held at Ouagadougou, 123-141.
- Kouressy, M., Niangado, O., Dembélé, T., Vaksmann, M., Trouche, G., Reyniers, F.-N., 1998.** La sélection de sorghos photopériodiques. Bacci L., Reyniers F.-N. (Eds). Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride. Actes du séminaire international, 27-30 avril 1998, Florence, Italie. Ed. CeSIA, Florence, Italie, CIRAD, Montpellier, France, pp 247-262.
- Maraux, F., Baron C., Forest F., Imbernon J., Ouaidrari H., 1994.** Prévisions de rendement du mil en Afrique Sahélienne; l'expérience du CIRAD. FAO, Colloque Villefranche sur mer, 24-27 octobre 1994.
- Morel, R., 1992.** Atlas agroclimatique des pays du CILSS. Centre AGRHYMET BP. 11011 Niamey.
- Ouattara, M., Vaksmann, M., Reyniers, F.-N., Kouressy, M., Niangado, O., 1998,** Variabilité phénologique des sorghos du Mali et adaptation à la diversité des agroécosystèmes.,
- Perez, P. 1994.** Etude du ruissellement sur les sols cultivés du Sud-Saloum : du diagnostic à l'aménagement de parcelles. Thèse de doctorat, ENSAM, Montpellier. 251 p.
- Perrier, A. 1984.** Mise à jour des définitions sur l'évapotranspiration et les besoins en eau des cultures. Les besoins en eau des cultures. Les Besoins en eau des cultures. INRA pp.881-883.
- R3S, 1991.** Symposium sur la Gestion Agroclimatique des Précipitations. Réseau de recherche sur la résistance à la sécheresse. Bamako - Décembre 1991.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L., Verma, S.B., 1983.** Microclimate: the biological environment. John Wiley and Sons. pp. 210-212.
- de Rouw, A., 2004.** Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. In Agricultural Systems 81 (2004) 73-93.
- Samba A., 1998.** Les logiciels Dhc de diagnostic hydrique des cultures. Prévision des rendements du mil en zones soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest. *Sécheresse* 9 (4), 281-288.
- Samba, A., Sarr, B., Baron, C., Gozé, E., Maraux, F., Clerget, B., Dingkuhn, M., 2001.** La prévision agricole à l'échelle du Sahel. In: Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M (eds.). Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision. Cirad and INRA, Montpellier, France, 243-262.
- ScopeL, E. (1999b).** Le semis direct avec paillis de résidus dans l'ouest mexicain: une histoire d'eau in *Agriculture et Développement*, **21** :71-86.
- Sivakumar, M.V.K., 1988.** Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and soudanian climatic zones of West Africa. Agric. Meteorol. 42, 295-305
- Traoré, S.B., Vaksmann, M., Kouressy, M., Coulibaly, H., Reyniers, F.-N., 1998.** Etude du développement d'un sorgho photopériodique du Mali., Bacci L., Reyniers F.-N. (Eds). Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride. Actes du séminaire international, 27-30 avril 1998, Florence, Italie. Ed. CeSIA, Florence, Italie, CIRAD, Montpellier, France, pp 109-122.
- Trouche G., Vaksmann M., Chantereau J., Kouressy M., Maïga H.D., Barro C., 1998.** Etude du déterminisme génétique du photopériodisme des sorghos guinea, Ratnadass A., Chantereau J., Gigou J.,

(Editeurs), Amélioration du sorgho et de sa culture en Afrique de l'Ouest et du Centre. Actes de l'atelier de restitution du programme conjoint sur le sorgho Icrisat-Cirad, 17-20 mars 1997, Bamako, Mali, Collection Colloques, Montpellier, Cirad-ca., 37-47.

Valentin, C. Bresson, L. 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55 :225- 245.

Varlet-Grancher and al., 1972. Semi-empirical Model based on the Monteith equation. Thesis in agronomy. Inra. France

Vaksmann, M., Traore, S.B., Niangado, O., 1996. Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et développement*. 9, 13-18.

Vaksmann, M., Traoré S., Niangado O., 1996. Le photopériodisme des sorghos africains, *Agriculture et Développement*, n°9, 13-18.

Witcombe J. R., Joshi A., Joshi K. D., Sthapit B. R., 1996. Farmer participatory crop improvement. I. Varietal selection and breeding methods and their impact on biodiversity. *Expl. Agric.*, volume 32. Pp. 445-460.

Wright A. J., 1976. The significance for breeding of linear regression analysis of genotype-environment interactions. *Heredity* 37 : 89-93.